

режимов функционирования объекта на основе моделирования в реальном времени.

Заключение

Представленная статья является первым шагом к созданию сложных цифровых двойников для технологических отраслей. Некоторые задачи уже решены, например, возможность построения точных нелинейных многомерных динамических моделей на основе рабочих данных замкнутого цикла [5]. Ведется работа по созданию триггеров для автоматического обучения и автономной параметризации соответствующих нейронных сетей. Выбор числа слоев в VAE или числа GRU в настоящее время выполняется в ручном режиме и требует знания среды глубокого обучения, а не инженерных областей.

Программный продукт ABB Ability™ APCA Suite — набор инструментов для построения аналитических

моделей [6] дополнен средствами моделирования, использующими VAE и RNN.

Список литературы

1. L. Ljung. Perspectives on system identification // Annual Reviews in Control. 2010. 34(1). pp. 1-12.
2. K. Hornik, et al. Universal approximation of an unknown mapping and its derivatives using multilayer feedforward networks // Neural networks. 1990. 3(5), pp. 551-560.
3. S.-C. Chen et al. Use a Machine's full capability // Pulp & Paper International (PPI), Process Control. pp. 39-42, March 2009.
4. S.-C. Chen et al. Multivariable CD control applications // IPW, Process and Quality Control, pp. 16-20, October 2008.
5. N. Lanzetti et al. Recurrent Neural Network based MPC for Process Industries // European Control Conference, Naples, Italy, 2019.
6. L. Dominguez and E. Galleste. "Leveraging advanced process control and analytics in industrial automation // ABB Review. 2018. № 02. pp. 38-45.

Мехмет Меркангез, Андреа Кортиновис — ABB Corporate Research (Baden-Dättwil, Switzerland),

Луис Домингес — Former ABB employee.

E-mail: mehmet.mercangoez@ch.abb.com andrea.cortinovis@ch.abb.com

DOI: 10.25728/avtprom.2020.09.04

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ТП НЕФТЕПЕРЕРАБОТКИ И НЕФТЕХИМИИ

Д. Челлани, С. Сривастава (Компания KBC)

Показана значимость технологической интеграции хозяйственных структур предприятий нефтепереработки и нефтехимии. Сформулированы сложности, возникающие при создании интегрированной модели ТП нефтепереработки и нефтехимии. Рассмотрены возможности среды Petro-SIM для создания интегрированных цифровых двойников ТП нефтепереработки и нефтехимии. Приведены примеры реальных проектов, реализованных компанией KBC.

Ключевые слова: цифровые двойники, компьютерное моделирование, нефтепереработка, нефтехимия, интегрированные модели ТП.

Введение

Технологическая интеграция хозяйственных структур предприятий нефтепереработки и нефтехимии позволяет предприятию получить ряд преимуществ в современных рыночных условиях, в частности, приносит ощутимый экономический эффект, выражающийся в качестве готового продукта. Ключевыми задачами таких интегрированных комплексов являются:

- снижение валовой стоимости нефтепродуктов за счет увеличения объема производства более дорогостоящей продукции;
- снижение затрат на сырье путем замены дорогого импорта сырьевыми потоками с низкой стоимостью.

Однако для реализации технологической интеграции хозяйственных структур нефтепереработки и нефтехимии требуются инструменты, позволяющие одинаково успешно оптимизировать управление

ТП нефтепереработки и нефтехимии. Традиционные инструменты, применяемые в области оптимизации управления процессами НПЗ, имеют существенные ограничения при управлении ТП в нефтехимии.

Задача установок по переработке нефти на НПЗ — это максимизация октано-тонн компонентов товарного бензина для их последующего смешения. Реакции изомеризации и дегидроциклизации улучшают октановые характеристики выходных продуктов, а термический крекинг является побочной реакцией, которую минимизируют для предотвращения потерь выходного продукта. Однако для процесса парового крекинга в нефтехимии, наоборот, оптимизируют термический крекинг нефти с целью получения олефинов.

Из-за такой разницы в типах реакций на установках в нефтепереработке и нефтехимии важным является выбор сырья для переработки. Замена состава сырья в ТП нефтепереработки может повысить

выход продукта на производстве нефтепереработки и нефтехимии, также снизить затраты на эксплуатацию (OpEx) — на энергопотребление, оборотную воду и пар, катализаторы и присадки.

Критерий подбора сырья на НПЗ основан на прогнозируемом выходе октано-тонн изокомпонентов. Например, для установки парового крекинга предпочтительнее использование легких углеводородов, таких как C_2 в отходящих газах и сжиженных углеводородных газов, так как их молекулы дают больший выход по легким олефинам.

Помимо желаемого качества продукта на выходе с установки при выборе сырья большое значение имеет OpEx и соотношение цен на нефтепродукты и нефтехимическую продукцию. Поэтому для оптимального распределения сырьевых потоков по установкам нефтепереработки и нефтехимии необходимы самые современные средства моделирования ТП нефтепереработки и нефтехимии соответственно.

При моделировании ТП нефтеперерабатывающих установок используются объемные свойства сырья, а для ТП нефтехимических установок важен углеводородный состав сырья. Создание комплексной модели, охватывающей оба производства, для инженеров-технологов долгое время была проблемной задачей. Так, инструменты, основанные на средствах линейного программирования (LP), позволяют решать задачи для ТП нефтепереработки, но имеют ограничения при описании ТП нефтехимии. Созданные LP-модели для нефтехимии могут дать неточные результаты.

Создание цифрового двойника интегрированного комплекса нефтепереработки и нефтехимии

Компания KBC разработала и создала для интеграции хозяйственных структур нефтепереработки и нефтехимии модели обоих ТП в среде Petro-SIM®. Модели являются кинетическими и позволяют учитывать конфигурацию реальной установки, а также осуществлять оптимизацию каждого ТП. Система Petro-SIM обеспечивает «бесшовный» переход от использования объемных свойств сырья в нефтепереработке к покомпонентному моделированию в нефтехимии и обратно. В Petro-SIM информация о компонентах, содержащаяся в специальной библиотеке компонентного состава перерабатываемой нефти, а также полученная из моделей реакторов нефтепереработки, передается в модели нефтехимических процессов. Модели реакторов калибруются на основе фактических показателей работы установки, что дает инженерам-технологам возможность отслеживать информацию на уровне «молекул», которая чаще всего является недоступной на технологической установке.

Модель интегрированного комплекса, включающая модели установок нефтеперерабатывающего и нефтехимического производств, связаны между собой едиными потоками: сырья, отходящих газов, выхода пропилена с завода, водородсодержащего газа и др.

У KBC накоплен значительный опыт по использованию интегрированных моделей для нефтеперерабатывающих и нефтехимических комплексов, позволяющих увеличить прибыль за счет перенаправления потоков, изменения жесткости процессов на установках и четкости фракционирования. При совместном владении предприятиями такая единая модель также играет большую роль при определении цены того или иного промежуточного продукта между владельцами с учетом параметров его качества. А ценность каждого из потоков определяется именно его углеводородным составом. Использование интегрированной модели позволяет также рассчитать затраты на энергоносители (воду, пар и электроэнергию).

Пример создания интегрированной модели производственного комплекса

Один из заказчиков компании KBC планировал строительство нового комплекса нефтепереработки и нефтехимии. Проект комплекса предусматривал использование потока компонентов C_5 с установки гидроочистки бензина каталитического крекинга в качестве сырья установки парового крекинга. Фракция C_5 имеет высокое содержание олефинов и поэтому дает низкий выход в реакциях крекинга, если только специально не настраивать режим гидрирования для насыщения олефинов. Исходя из относительно небольшого количества фракции C_5 , отдельная система гидрирования была экономически не оправдана.

Альтернативой стало смешение данной фракции C_5 с пулом бензинов, так как за счет высокого октанового числа и более низкой удельной плотности она сможет повысить объем бензинов. Однако простое перенаправление данного потока на производство бензинов без других изменений приведет к падению выхода на установке нефтехимии и, как следствие, падению общей маржинальности предприятия. Еще одним потенциальным ограничением было высокое давление насыщенных паров потока C_5 , которое повлечет за собой сложности с выполнением требований по давлению насыщенных паров и индексу паровой пробки бензина.

Специалисты KBC рассмотрели все существующие потоки, которые смогут заменить имеющийся поток фракции C_5 в качестве сырья крекинга. Часть рафината с комплекса ароматики была направлена на установку крекинга в качестве сырья, а другая часть направлялась на производство бензинов для удовлетворения объемов выпуска товарного бензина. Рафинат богат парафинами и содержит компоненты $C_6 - C_8$, а также является идеальным сырьем для парового крекинга. Поэтому специалистами KBC было рекомендовано заменить поток фракции C_5 на входе установки парового крекинга на поток рафината и направить на производство бензинов освободившееся количество фракции C_5 .

В данном проекте интегрированная модель хозяйственных структур (рис. 1) рассматриваемых пред-



Рис. 1. Модель интеграции хозяйственных структур нефтеперерабатывающего производства и комплекса парового крекинга

приятый применялась для оценки влияния состава сырья установки крекинга на выход ее продуктов, а также на изменение давления насыщенных паров и индекс склонности к образованию паровой пробки (для товарного бензина). Были проанализированы летний и зимний режимы работы завода, то есть учитывалась разница свойств продукции, вызванная сезонной эксплуатацией (зима/лето). Анализ показал возможность полного вовлечения фракции C_5 в пул бензинов как при летней, так и при зимней эксплуатации. Использование рафината в качестве сырья парового крекинга вместо фракции C_5 приводит к увеличению выхода продукции на нефтехимическом производстве при фиксированной выработке бензинов на нефтеперерабатывающем производстве. Это привело к экономии около 7 центов/баррель нефти.

Владельцы заводов хотели иметь интегрированный цифровой двойник, описывающий поведение ТП нефтепереработки и нефтехимии в реальном времени. Для получения цифрового двойника интегрированная модель хозяйственных структур двух заводов была дополнена оперативными эксплуатационными данными из распределенных систем управления, исторического сервера (OSIsoft PI или др.) и системы лабораторных данных (LIMS), передаваемыми в модель в реальном времени.

Для отслеживания показателей работы установки применяются выбранные заказчиком коэффициенты производственной эффективности (KPI). Одним из таких KPI является сравнение согласованных данных материального баланса с результатами моделирования ТП и с результатами в LP-модели, которое используется для проверки работы инструментов моделирования.

Утилита по согласованию данных в программе Petro-SIM оценивает степень корректности исходных данных, полученных из исторического сервера и LIMS; обеспечивает согласование исходных дан-

ных (материальный баланс, баланс по сере и азоту, углероду и водороду и др.) и передачу согласованных значений в модуль, отвечающий за калибровку.

С помощью цифрового двойника можно оценивать значения таких параметров ТП, как скорость паров в циклонах реакторного блока установки каталитического крекинга, химическое поглощение водорода в каждом реакторе, оставшийся срок службы катализатора на установках гидроочистки и т.д. Показатели повышения прибыльности (МП), введенные в цифровой двойник, демонстрируют потерю прибыли или отставание, которое необходимо сократить для повышения прибыльности комплекса.

Влияние значения МП на маржу оценивается по расчетам интегрированного цифрового двойника и задается на цифровом двойнике каждой технологической установки. Мониторинг процессов с помощью МП создает инженерам-технологам и операторам условия для постоянной оптимизации работы каждой установки в нефтепереработке и нефтехимии. Отклонения от целевых значений и возникающие вследствие этого потери сохраняются в регулярных отчетах, и по ним планируются ответные действия, создавая культуру прибыльности в компании.

Пример цифрового двойника для двух сотрудничающих предприятий

Компания КВС сотрудничала с НПЗ по производству легких и средних дистиллятов для внутреннего рынка. Недалеко от него другой компанией был выстроен новый комплекс по ароматике. Основным сырьем этого комплекса служила импортируемая нефть. Хотя часть покупаемой нефти поступала на этот новый комплекс с соседнего НПЗ, оба предприятия вели свой собственный производственный учет и считывались по экономической эффективности на основе цены передаваемого потока нефти.

НПЗ использовал нефть как компонент смешения с низкой температурой вспышки для производства средних дистиллятов, а излишки поставлялись на комплекс производства ароматики. Цена поставок нефти на комплекс по производству ароматики была невысокой, поэтому для НПЗ было более выгодным использование нефти для смешения.

После проведения соответствующих изысканий специалисты КВС выяснили, что нефть с НПЗ уступает по качеству той, что комплекс ароматики импортирует из другого источника. В продукте НПЗ было более высокое содержание парафинов, к тому же он насыщен группами C_7 , в то время как нефть другого источ-



Рис. 1. Модель интеграции хозяйственных структур нефтеперерабатывающего производства и комплекса парового крекинга

ника имела более высокое содержание C8/C9. Ввиду этого руководством НПЗ было решено понизить цену на свою нефть по отношению к импортируемой.

Экономическая целесообразность снижения цены на нефть НПЗ по отношению к нефти другого источника была рассчитана интегрированной моделью, объединяющей модели ТП нефтепереработки и нефтехимии. В модели был заложен так называемый сценарий чувствительности, то есть смоделирована замена части используемой комплексом импортируемой нефти на нефть с НПЗ. Оба предприятия рассматривались как единый комплекс, по которому проводилась оптимизация, то есть для оценки экономического влияния этой замены на весь комплекс не использовалась цена передачи. Сценарий чувствительности показал прибыль >5 млн. долл. США/г без необходимости инвестирования.

Предложенные изменения были приняты и введены обеими компаниями. Интегрированная технологическая модель рассчитала равновесную цену на нефть НПЗ (рис. 2). Затем компании согласовали размер скидки от этой цены, предоставляемой НПЗ владельцу комплекса ароматики на закупку нефти. После пересмотра цены оба предприятия оказались в прибыли. Пользуясь интегрированной моделью, способной

отслеживать потоки на предмет изменения качества, стало возможным обновить и внедрить новую стратегию эксплуатации на обеих площадках.

Заключение

Цифровой двойник нацелен на максимально точное отображение производственных активов во всем диапазоне их эксплуатации и в течение всего жизненного цикла. В идеале он создается во время проведения экономического обоснования создания самого актива. Цифровой двойник применяется и дорабатывается в процессе

проектирования, строительства и ввода актива в эксплуатацию. Он обеспечивает оптимальный проект объекта и обучение персонала, которые будут его эксплуатировать. Он работает в настоящем, зеркально отображая объект в режиме моделирования, но обладает полным объемом исторической информации о показателях его работы в прошлом и точным пониманием его потенциала в будущем. Цифровой двойник компании КВС создан на базе универсальной системы технологического моделирования Petro-SIM.

Данные для цифровой модели, получаемые в режиме реального времени с производства, проверяются и согласовываются (с учетом данных статистики) с соблюдением всех химических и физических принципов. Все ошибочные измерения и динамические эффекты фильтруются, что обеспечивает своевременное выявление и устранение проблем с качеством данных.

Пакет Petro-SIM позволяет осуществлять мониторинг за работой производственных установок в режиме реального времени и улучшать показатели работы предприятия в целом. Потенциал возможных улучшений для интегрированного комплекса хозяйственных структур перерабатывающего и нефтехимического производства является весьма существенным.

Джитендра Челлани — старший консультант компании КВС (часть группы компаний Yokogawa) в Абу-Даби,

Сачин Сривастава — консультант нефтехимической отрасли компании КВС

(часть группы компаний Yokogawa) в Мумбае.

Контактный телефон компании Yokogawa (495) 737-78-68.

[Https://www.yokogawa.ru](https://www.yokogawa.ru)

Оформить подписку на журнал "Автоматизация в промышленности" вы можете:

- по электронному каталогу "Почта России" ФГУП Почта России - подписной индекс **П7753**.
- в России, странах СНГ и дальнего зарубежья – через редакцию (www.avtprom.ru).

Все желающие, вне зависимости от места расположения, могут оформить подписку, начиная с любого номера, прислав заявку в редакцию или оформив анкету на сайте www.avtprom.ru

В редакции также имеются экземпляры журналов за прошлые годы.